



**Jean-Pierre HAUET**

Associate Partner KB Intelligence

Membre Émérite (2008) de la SEE

# L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE : PERSPECTIVES ET RÉALITÉS

La conversion photovoltaïque fait partie des « technologies cycliques ». Ces technologies, très attractives sur les plans industriel et scientifique, occupent périodiquement le devant de la scène, à la fréquence du renouvellement des générations, et souvent à l'occasion de crises économiques ou énergétiques. De grands espoirs jaillissent alors, qui expliquent que soient revisitées les études déjà faites dans le passé, et que soient mises en place de nouvelles politiques de soutien public. Malheureusement, les résultats ne sont pas toujours au rendez-vous, et la technologie retourne alors à une nouvelle période d'hibernation. Les piles à combustible, l'hydrogène, le véhicule électrique, les supraconducteurs à haute température critique font partie de ces comètes technologiques. Fort heureusement, il arrive que le degré de maturité technique et les conditions du marché permettent à des technologies de décoller, et leur développement peut alors être très rapide : le cas des écrans plats en est la meilleure illustration.

Celui du photovoltaïque interpelle : le phénomène physique est ancien ; il a connu ses premières heures de gloire avec le lancement en 1958 des premiers satellites américains et, après les chocs pétroliers de 1973 et 1979, il a suscité l'engagement, dans tous les pays, et en France en particulier, de plans de développement s'inscrivant dans des stratégies de promotion des énergies réputées à l'époque « nouvelles ».

La conversion solaire photovoltaïque suscite à nouveau, depuis quelques années, un engouement tout particulier dans le cadre de la recherche d'énergies propres, durables et aptes à se substituer aux énergies fossiles. Ses indicateurs sont « au vert » sur le plan industriel et sur le plan commercial. Mais s'agit-il à nouveau d'un feu de paille et d'une bulle amenée à éclater sous les rayons du soleil, ou bien l'éclosion d'un segment significatif de l'approvisionnement énergétique est-elle cette fois vraiment amorcée ?

Le présent dossier s'efforce d'apporter des éléments de réponse à ce débat en donnant la parole à six experts, qui ont bien voulu intervenir lors d'un séminaire

organisé conjointement par la SEE et ISA-France les 29 et 30 avril 2009 à Paris.

Bernard Equer, directeur émérite au CNRS, dresse un panorama de l'évolution technologique de la conversion photovoltaïque. Il rappelle que la filière au silicium, qu'il soit monocristallin ou polycristallin, reste dominante sur le marché. Il souligne que cette filière, qui s'appuie sur un matériau abondant et bon marché, a considérablement progressé au cours des dernières années, avec des rendements énergétiques de 13 à 20 % pour les produits commerciaux et des prix de quelques euros par watt<sub>crête</sub>. Cette filière conventionnelle recèle encore des voies de progrès, grâce notamment à une diminution de l'épaisseur des cellules.

En parallèle, les toutes dernières années ont vu l'émergence industrielle des solutions en couches minces, qu'il s'agisse de tellurure de cadmium (CdTe) ou de chalcopyrites associant cuivre, indium, gallium et sélénium. De 150 µm, la couche active peut alors passer à quelques µm, avec les économies de coût que l'on imagine. Le prix de revient d'un dollar par watt<sub>crête</sub> serait d'ores et déjà atteint pour les cellules les plus compétitives. Ce "breakthrough" technologique permet à la filière photovoltaïque de se rapprocher de la compétitivité avec les modes conventionnels de production de l'électricité en réseau (ce qu'on appelle la "grid parity"). La distance en est cependant, sous nos latitudes, encore importante (il faut compter sur un prix de revient du kWh photovoltaïque compris entre 0,3 et 0,5 € selon la taille des installations, soit 5 à 10 fois celui du kWh conventionnel). Mais des avenues de progrès technologique sont tracées :

- La conversion multispectrale permettra de porter les rendements à au moins 25 %, sachant que 42,8 % constitue le record actuel en laboratoire.
- De nouveaux matériaux font l'objet d'études intenses de par le monde : les cellules « à colorants » (ou cellules de Graetzel) apparues en 1991, et les matériaux organiques, polymères semiconducteurs ou organiques moléculaires.

Ces recherches ouvrent la voie à des matériaux, généralement à rendements plus faibles, mais pouvant être supportés par des substrats les plus variés, y compris par des supports flexibles.

Face au défi technologique ainsi rappelé par Bernard Equer, Jean-Louis Bal, directeur des Énergies renouvelables de l'ADEME, brosse un tableau de la stratégie française de développement du solaire photovoltaïque. Cette stratégie est en ligne avec le « paquet énergie-climat » adopté fin 2008 au niveau européen, qui conduit, pour la France, à une contribution des énergies renouvelables de 23 % dans son bilan énergétique 2020. Cet objectif implique pour le photovoltaïque une puissance installée de 5 400 MW<sub>crête</sub>, contre 180 MW<sub>crête</sub> à fin 2008. Pour assurer une telle croissance, la France fait le pari de l'intégration du photovoltaïque dans le bâtiment : les panneaux photovoltaïques peuvent devenir des composants des toitures ou des vitrages. Un tarif de rachat particulièrement avantageux de l'électricité photovoltaïque (550 €/MWh) est en conséquence mis en place sur 20 ans, pour une période allant au moins jusqu'en 2012. Cependant, les applications au sol ne sont pas négligées, et les tarifs de rachat permettent à de grands projets de centrales photovoltaïques (plusieurs MW) de voir le jour. Enfin un intérêt particulier est porté aux applications dans les territoires d'outre-mer.

Les pouvoirs publics français ont ainsi pour objectif de faciliter le développement d'une filière photovoltaïque intégrée, pouvant générer 13 000 emplois dès 2012, cependant qu'un effort de promotion de la recherche-développement est engagé au travers de l'ANR, de l'INES, de l'ADEME et des pôles de compétitivité.

La quasi-totalité des raccordements photovoltaïques se font sur le réseau de distribution en BT ou en HTA, selon la puissance mise en jeu. L'explosion des demandes de raccordement est un problème auquel ERDF, principal gestionnaire de réseau, doit faire face. Jean-Luc Fraisse, responsable du service raccordement au sein de la Direction réseau d'ERDF, explique comment ERDF s'efforce d'y répondre. À fin septembre 2009, 30 495 sites photovoltaïques étaient raccordés au réseau pour une puissance totale de 141 MW<sub>crête</sub>, cependant que 34 340 demandes étaient à l'instruction pour une puissance de 1 659 MW<sub>crête</sub>, ce qui traduit un décuplement de la taille des installations candidates au raccordement.

Les règles techniques de raccordement et la philosophie de gestion du réseau doivent être aménagées en conséquence. Alors que traditionnellement la mission du réseau était d'acheminer de la puissance de l'amont vers l'aval, l'insertion de sources de production décentralisées l'amène à assurer l'évacuation de la puissance produite lorsqu'elle est localement excédentaire, en veillant au respect de la stabilité du plan de tension

dans les limites imposées. Le développement du photovoltaïque constitue un triple défi : en termes de capacité de traitement des demandes de raccordement, en termes de gestion du plan de tension et en termes de maintien de l'équilibre production-consommation, ce qui supposera la mise en œuvre à terme de solutions de stockage et de gestion de la charge et de la production.

Il est à noter que depuis la tenue du séminaire d'avril 2009, les pouvoirs publics français ont été amenés à prendre des mesures de régulation du marché face à l'emballement des demandes de raccordement. De nouveaux tarifs de rachat de l'électricité d'origine photovoltaïque ont été ainsi définis par l'arrêté du 12 janvier 2010 qui précise la notion d'installation intégrée au bâti, introduit celle d'installation partiellement intégrée et organise la décroissance des tarifs de rachat à partir de 2012.

Fabrice Juquois, président de Photéïs, analyse plus en détail des diverses applications envisageables pour le photovoltaïque, et distingue trois vagues successives d'applications :

- Les applications pour les sites très isolés, dans le domaine spatial notamment.
- Les applications terrestres, pour l'électrification rurale des pays en développement notamment.
- Les applications à plus grande échelle, sous forme de générateurs photovoltaïques raccordés au réseau, soit sur bâti, soit en plein champ.

Bien que le photovoltaïque nécessite encore des programmes de soutien, Fabrice Juquois note que son coût a été divisé par un facteur 40 depuis les années 70, et qu'il est raisonnable de penser qu'il constituera dans le futur une alternative crédible au fossile et au nucléaire.

Bertrand Dellinger, directeur général d'APEX BP Solar, donne un coup de projecteur sur les applications du photovoltaïque dans les zones les plus isolées du globe ; là où la solution solaire est parfois la seule et toujours la meilleure, permettant d'assurer l'accès à l'électricité, à l'eau et aux télécommunications. Bien que ces applications "off grid" soient actuellement très minoritaires par rapport aux applications raccordées au réseau qui bénéficient de tarifs de rachat très avantageux, il ne faut pas oublier qu'en termes de développement durable, apporter l'électricité là où elle est absente est sans aucun doute l'une des actions les plus profitables qui puisse être menée actuellement.

Enfin Toufiké Henni-Chebra, directeur du Cnam Ardèche, rappelle que le développement d'une filière technologique nouvelle suppose nécessairement la mise en place de moyens de formation appropriés. Un exemple en est donné avec le projet PHYSER piloté par le Cnam en Ardèche et qui vise à construire une

centrale photovoltaïque d'une puissance minimale de 1 MW, qui constituera à la fois un outil de démonstration et de recherche et un outil industriel assurant, grâce à la vente de l'électricité produite, des revenus qui permettront de financer les formations et le fonctionnement d'un centre de développement.

On le voit au travers de ces six contributions, le photovoltaïque est entré dans une phase cruciale de son histoire. Son taux de croissance est impressionnant, les progrès accomplis depuis 30 ans sont exceptionnels et les perspectives de progrès technologiques et économiques demeurent très vastes. La partie n'est cependant pas encore gagnée, car le photovoltaïque tire son succès des conditions de rachat très favorables qui sont consenties au profit de l'électricité qu'il produit.

La parité avec le réseau est, dans nos régions, encore très éloignée, alors que déjà se profilent des problèmes difficiles de raccordement et de gestion des énergies intermittentes et décentralisées. L'expérience française tendant à privilégier l'intégration au bâti est en conséquence très intéressante et originale à plus d'un titre, en ouvrant notamment la voie à la création d'un nombre substantiel d'emplois qualifiés. Cependant la question peut être posée de savoir si des moyens financiers excessifs ne sont pas actuellement dévolus au développement d'une filière aujourd'hui bien maîtrisée, celle du silicium, alors que les couches minces et les filières de troisième génération nécessitent un effort de recherche-développement très important, auquel la France se doit de participer.

## Sommaire Dossier

### Présentation

*Par Jean-Pierre Hauet* ..... p. 23

### Les filières photovoltaïques. Etat des lieux et perspectives

*Par Bernard Equer* ..... p. 23

### La stratégie française de développement du solaire photovoltaïque

*Par Jean-Louis Bal* ..... p. 23

### La production photovoltaïque et les réseaux de distribution

*Par Jean-Luc Fraisse* ..... p. 23

### Les applications de l'électricité d'origine photovoltaïque : histoire et perspectives

*Par Fabrice Juquois* ..... p. 23

### L'alimentation des sites isolés en énergie photovoltaïque : développer sans polluer

*Par Bertrand Dellinger, Michel Mansard* ..... p. 23

### Développement d'un centre de compétences dans les énergies renouvelables et les réseaux électriques intelligents

*Par Toufiké Henni-Chebra* ..... p. 23